

자동굴절검사기용 대형 원판형 기어의 변형 최적화

Optimization of the Deflection for large Disk type Gear of Auto Phorofter

정태성^{1,✉}

Tae Sung Jung^{1,✉}

1 인하공업전문대학 기계설계과 (Department of Mechanical Design, Inha Technical College)

✉ Corresponding author: tsjung@inhac.ac.kr, Tel: 032-870-2154

Manuscript received: 2010.12.29 / Accepted: 2010.1.3

Recently, the application range of plastic gears is widely expanding by the development of engineering plastics with good mechanical properties. Plastic gears have excellent performances such as light weight, water resistance and vibration absorbing ability for metallic gears. In this study, the optimization of injection molding process was done for the large disk type plastic gears of auto phorofter. Design Of Experiment (Taguchi method) was adopted to find a tendency of molding conditions that influence the flatness of disk type gear. Four main factors for molding conditions were selected based on injection temperature, filling time, packing pressure and mold temperature. Also, Filling, packing and cooling analyses were carried out to evaluate Z directional deflection of large disk type gear by using the simulation software(Moldflow) based on the DOE. From the results, it was found that the injection temperature and packing pressure are the most sensitive parameters for the Z directional deflection of large disk type gears .

Key Words: Disk type Plastic Gear (원판형 플라스틱 기어), Auto Phorofter (자동굴절검사기), Design of Experiments(실험계획법), Warpage (변형), ANOVA (분산분석법), S/N Ratio (신호대 잡음 비)

1. 서론

기어는 중요한 핵심 기계 요소 중 하나로서 지금까지는 주로 절삭가공에 의해 중대형 기어를 중심으로 생산되어 왔으나 제품의 성능 향상 및 소형화 경량화 저소음화 등의 소비자 요구를 만족시키기 위한 노력에 편승하여 정밀도가 높은 플라스틱 기어에 대한 생산 요구가 증대되고 있는 실정이다.

정밀 플라스틱 기어는 시계 기어로부터 가전제품, AV 기기, 자동차, 생활 용품, 사무기 자동화기기, 광학 기기 등 각종 완성 제품에 사용되고 있을 뿐 아니라, 초소형 이송 장치, 정밀 인덱스 기구, 자동 조립기 등과 같은 공장 자동화 요소 부

품 등에 핵심적으로 사용되고 있어 그 적용 분야가 매우 광범위 하다.^{1,2}

플라스틱 기어는 금속 기어와 비교하여 고온에서 강도가 저하되고, 인장강도와 굽힘 강도는 강의 약 1/8~1/10 이며, 탄성계수는 약 1/70~1/100 정도로 낮지만, 최근 수지의 개량이 진행되어 강도, 내열성의 향상과 함께 플라스틱 특성을 살려 적용 분야를 넓혀가고 있다.³⁻⁶ 특히, 플라스틱기어는 경제적인 대량생산이 용이하고, 경량화가 가능하며, 무윤활 사용, 각종 기계 요소와의 일체 성형 등의 이점 이외에도 진동 흡수성이 있고, 내식성, 내약품성이 뛰어나 그 사용이 증대되고 있으며,⁷ 국내에서도 정밀 플라스틱 기어 제조기술 개발이 꾸준히 진행되고 있다.

플라스틱 기어 제조에 있어서 중요한 기술로는 크게 3 가지로 구분 될 수 있으며 이는 수축에 따른 치형 설계 및 Hob Cutter 설계, 금형 구조 및 부품 설계 등의 각종 설계 기술과 가공 공정 및 방법, 측정 및 조립이 고려된 제조기술 그리고 최적의 성형 조건 및 성형품의 품질검사, 관리 등이 고려된 성형 기술 등이다. 이에 이론적, 실험적 방법을 통하여 기어의 정밀도 및 내구 수명 향상을 위한 플라스틱 기어의 치형 설계, 금형 설계, 제조 공정 개발, 성형 공정 최적화 등의 노력이 지속적으로 이루어져 왔다.¹⁻⁹

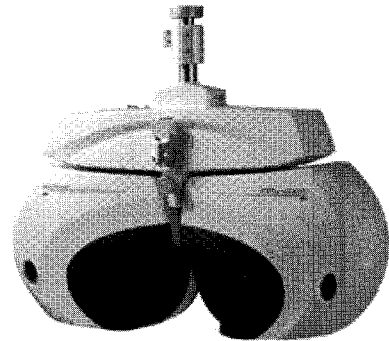
본 연구는 자동굴절검사기(auto phoropter)에 사용되는 110mm 급 대형 원판형 기어의 성형 품질을 향상하기 위한 연구로서 다양한 연구분야에서 실험인자와 특성치의 상호관계를 효과적으로 분석하는 방법으로 널리 알려진 실험 계획법(Design of Experiments; DOE)을 적용하여 공정 조건이 기어의 평탄도에 미치는 영향을 살펴보았다.^{3,4,7}

사출온도, 충전시간, 보압압력과 금형온도를 4 가지 주요 공정변수로 선택하고 직교 배열법을 적용하여 성형 해석을 수행하였으며, 성형해석으로 예측된 변형량 결과를 분석하였다. 그 결과 유리 강화섬유가 포함된 원판형 플라스틱 기어의 성형에 있어 사출온도와 보압압력이 평탄도에 가장 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며, 이를 바탕으로 실제 개발 금형을 제작하여 제품생산에 적용하였다.

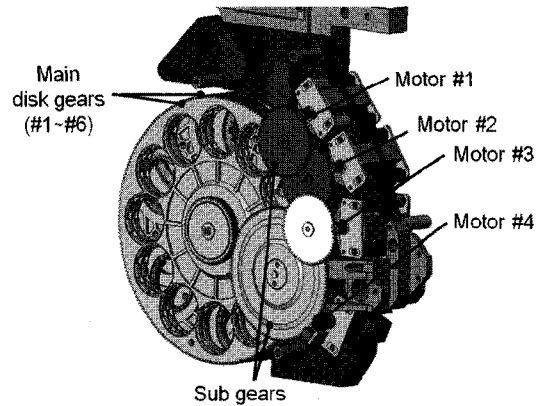
2. 원판형 플라스틱 기어의 형상

자동굴절검사기는 시력을 측정하여 환자에게 편안한 적응시력을 자각식으로 검사하는 계측기기로서 시험테를 사용할 때보다 환자가 더 편안함을 느끼며, 검사자에게도 측정오차 및 유지보수에서 유리한 장점이 있어 안과 등에서 사용이 증가되고 있다.

자동굴절검사기는 보통 좌안과 우안 각각 6 장의 대구경 디스크로 되어있으며, 각 디스크는 6 개에서 12 개의 렌즈가 디스크의 원주 부근에 뚫려 있는 구경부에 끼워져 있으며, 유성 기어(planetary gear)장치를 통해 동일한 축 방향으로 가입된 원주 렌즈의 조합으로 적응 시력을 측정하게 된다. Fig. 1 은 일반적인 자동굴절검사기의 외형과 내부 구성을 보여준다.



(a) Photograph of conventional auto phoropter system



(b) Mechanical configuration of auto phoropter
Fig. 1 System configuration of auto phoropter

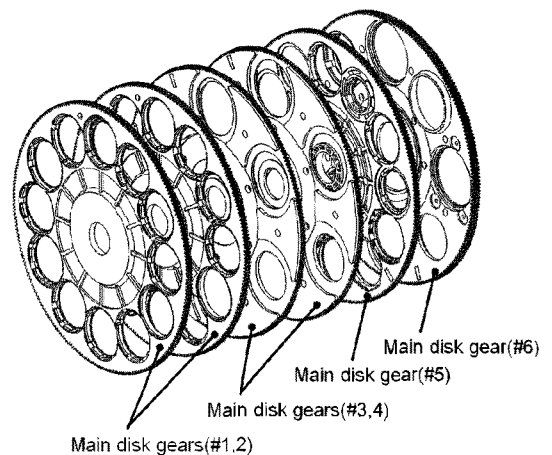


Fig. 2 Configuration of main disk gears

본 연구에서의 자동시력검사기는 Fig.2 와 같이 서로 다른 4 종류의 6 개 주 원판형 기어로 구성되는데, 광학 기기의 특성상 디스크의 휨(warpage)에 의해 렌즈 사이의 초점 거리가 달라질 경우 측정

시력이 달라지므로 렌즈가 삽입된 디스크의 평탄도가 중요한 품질관리 기준이 된다. 특히, 디스크 기어가 동일 축 상에 6 개 삽입되므로 각각의 변형량이 누적되어 제품 품질에 영향을 미치므로 사출품의 성형 공정 관리가 매우 중요하며, 해당 시스템에서 누적공차를 고려한 변형 허용치는 일반적으로 0.2mm 이내로 제한된다.

기어와 같은 축대칭 원주형의 플라스틱 제품을 성형함에 있어서 기어의 중심점에 게이트를 설계하는 것이 치수 안정성, 균일한 유동속도 및 수축에 바람직하나, 기어는 중심점에 축이 존재하므로 게이트를 설계할 수 없다.

본 연구에서는 대형 원판형 플라스틱 기어의 성형에 있어서 평탄도 향상을 위하여 실험계획법을 적용하여 변형량을 최소화하였으며, 4 종류의 주 원판형 기어 중 두께가 가장 얇아 변형에 취약할 것으로 예상되는 디스크 기어(#3, #4)를 대상으로 성형해석과 실험계획법을 기반으로 한 성형공정 최적화를 수행하였다.

Table 1 과 Fig. 3 는 디스크 기어(#3, #4)의 개략적인 형상과 사양을 보여준다. 해당 기어는 유리 강화섬유 (glass fiber)가 30% 함유된 폴리카보네이트(polycarbonate) 수지로 이루어진 평기어의 형태로 직경 110mm 정도의 크기를 가진다.

Table 1 Specification of disk gear(#3,#4)

| | |
|-----------------|------------|
| Number of teeth | 240 |
| Module | 0.45mm |
| Pitch diameter | 108mm |
| Material | PC + GF30% |

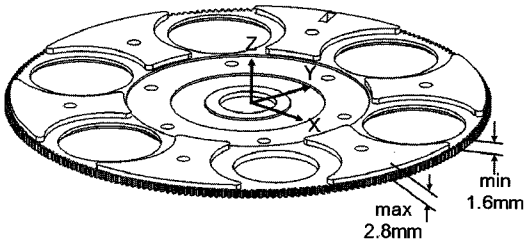


Fig. 3 Schematic drawing of main disk gear(#3,#4)

3. 사출공정 최적화

3.1 플라스틱 기어의 성형 해석

반복적인 시성형으로 성형 조건을 최적화할 경우 시간적 및 경제적 손실이 매우 크게 발생한다. 따라서, 최근 유한요소해석 기술의 발전과 더불어 사출성형관련 연구에서는 성형해석을 통하여 사출성형특성을 고찰함으로써 품질 특성치를 만족하는 최적의 공정 조건을 선정하는 경우가 많다.^{3,4,10}

본 연구에서는 디스크 기어의 변형량을 예측하기 위한 시뮬레이션 도구로 Autodesk 사의 Moldflow MPI v.2010 을 사용하여 소프트웨어로 모의 실험을 하였으며, 충전, 보압, 냉각과정의 해석을 수행하였다.

Fig. 4 는 성형해석을 위한 유한요소와 유동시스템, 냉각시스템의 모델링을 나타낸다. 대상물이 전체적으로 두께 변화가 적은 평판 구조의 형상을 지니는 점을 고려하여 퓨전 메쉬(fusion mesh)를 사용하였다. 해석모델은 39374 개의 삼각형 메쉬와 19536 개의 노드(node)를 가지며 87.8%의 매칭률(match percent)을 나타내었다.

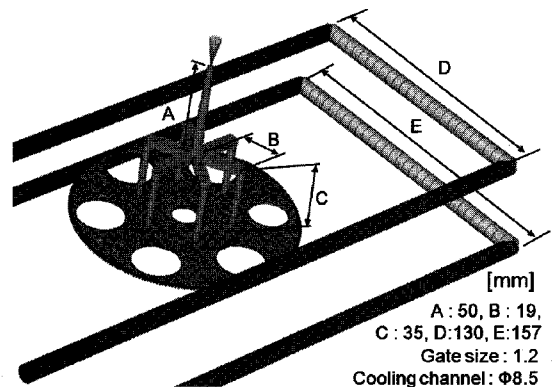


Fig. 4 Elements for FEM analysis

3.2 실험 계획

본 연구에서는 제품설계와 공정설계에서 유용하게 사용되는 다구짜 실험계획법의 하나인 파라미터 설계(parameter design)를 이용하였다.⁴

사출성형품의 품질 특성치에는 치수, 강도 등 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 사출 성형 후 Z 방향의 변형량으로 정하고, Table 2 와 같이 성형공정 변수 중 섬유 배향 및 수축으로 인한 기어의 변형에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 사출온도(A), 사출시간(D), 보압압력(C), 금형온도(D)를 제어인자로 선정하였다. 각 인자에 대한 수준은 성형 한계 내에서 재료의 물성치와 생산성을

Table 2 Main variables and levels for D.O.E

| Main variables | Level | | | Unit |
|----------------------|-------|-----|-----|------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| Injection temp. (A) | 300 | 320 | 340 | ℃ |
| Filling time (B) | 0.5 | 1 | 1.5 | sec |
| Packing pressure (C) | 10 | 13 | 16 | MPa |
| Mold temp. (D) | 80 | 95 | 110 | ℃ |

고려하여 다음과 같이 각각 3 수준으로 결정하였다.

제어 인자를 배치하기 위한 직교표는 $L_{27}(3^{13})$ 표로 선정하여 교락을 피하고 각인자의 주효과만을 결과로 얻을 수 있도록 1 열, 2 열, 5 열, 10 열에 각각 제어인자를 배열하였다.

성형 해석에서 보압전환은 95% 충전 시점으로 하였으며, 게이트 고화시간을 고려하여 3 초간 보압 후 10 초간 냉각하였다.

3.3 실험 결과 및 분석

다음 Table 3 은 할당된 제어 인자와 성형해석으로 예측된 변형량을 보여준다.

최적화 목표치를 Z 방향 변형값으로 잡고 망소 특성으로 진행하였으며, 분석 도구는 KAIST 산업공학과에서 개발된 다구치 해석용 소프트웨어인 KAISTAT version 1.3 을 사용하였다.

원관형 기어의 변형에 미치는 주인자와 2 인자 교호작용 별 영향력을 Table 4 의 분산분석(ANOVA)을 통해 확인할 수 있으며, 가장 큰 영향을 미치는 요인은 사출온도로 분석되었고, 보압 압력, 충전시간의 순으로 기여도가 있었다. 금형온도는 타 제어 인자 대비 기여도가 작음을 알 수 있으며, 제어 인자 간의 교락은 없었으며 교호작용의 영향은 최적값 예측 시 풀링(pooling)하였다.

Fig. 5 는 신호 대 잡음 비의 분석결과를 보여준다. 분석결과에서 수지 온도가 높을수록, 보압이 클수록, 사출속도가 빠를수록 기어의 평탄도가 향상되었고, 최적 성형조건은 $A_3B_1C_3D_1$ 으로 예측되었다. 이때 통계적으로 예측된 Z 방향 변형량은 0.140mm 로 직교표에서 실험번호 21 번의 실험조건에서 성형해석으로 예측한 0.141mm 와 유사하다.

Table 3 Orthogonal array for Taguchi DOE and results

| Case# | A | B | C | D | Z-directional Deflection (mm) |
|-------|---|---|---|---|-------------------------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.253 |
| 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 0.212 |
| 3 | 1 | 1 | 3 | 3 | 0.191 |
| 4 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0.285 |
| 5 | 1 | 2 | 2 | 3 | 0.231 |
| 6 | 1 | 2 | 3 | 1 | 0.205 |
| 7 | 1 | 3 | 1 | 3 | 0.302 |
| 8 | 1 | 3 | 2 | 1 | 0.252 |
| 9 | 1 | 3 | 3 | 2 | 0.220 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 3 | 0.208 |
| 11 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0.178 |
| 12 | 2 | 1 | 3 | 2 | 0.163 |
| 13 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0.231 |
| 14 | 2 | 2 | 2 | 2 | 0.194 |
| 15 | 2 | 2 | 3 | 3 | 0.181 |
| 16 | 2 | 3 | 1 | 2 | 0.247 |
| 17 | 2 | 3 | 2 | 3 | 0.210 |
| 18 | 2 | 3 | 3 | 1 | 0.187 |
| 19 | 3 | 1 | 1 | 2 | 0.178 |
| 20 | 3 | 1 | 2 | 3 | 0.164 |
| 21 | 3 | 1 | 3 | 1 | 0.141 |
| 22 | 3 | 2 | 1 | 3 | 0.195 |
| 23 | 3 | 2 | 2 | 1 | 0.167 |
| 24 | 3 | 2 | 3 | 2 | 0.154 |
| 25 | 3 | 3 | 1 | 1 | 0.220 |
| 26 | 3 | 3 | 2 | 2 | 0.180 |
| 27 | 3 | 3 | 3 | 3 | 0.166 |

Table 4 Analysis of variance(ANOVA)

| Factor | DF | $\sum x^2$ | MS | F value |
|--------|----|------------|---------|----------|
| A | 2 | 34.1481 | 49.1288 | 505.5991 |
| B | 2 | 8.6722 | 12.4040 | 128.4009 |
| C | 2 | 25.8000 | 37.0945 | 381.9957 |
| D | 2 | 0.0448 | -0.0328 | 0.6632 |
| AxB | 4 | 0.0743 | -0.0877 | 0.5497 |
| AxC | 4 | 0.2618 | 0.1827 | 1.9384 |
| BxC | 4 | 0.1661 | 0.0447 | 1.2296 |
| Error | 6 | 0.2026 | 1.2657 | |
| Total | 26 | 69.3699 | | |

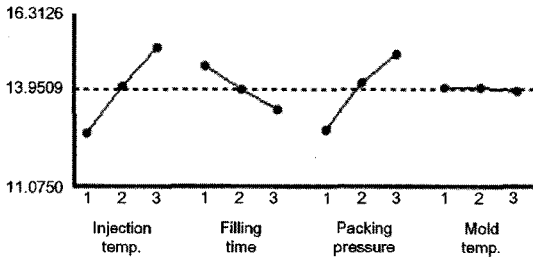


Fig. 5 Signal to noise ratio for Z-dir. deflection

Fig. 6 은 $A_3B_1C_3D_1$ 조건에서 성형해석으로 예측된 기어의 변형량을 보여준다.

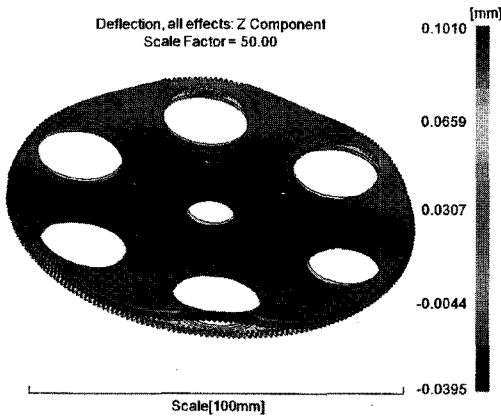


Fig. 6 Predicted Z-dir. deflection at $A_3B_1C_3D_1$ condition

수지 온도가 높을수록, 보압이 클수록, 사출속도가 빠를수록 기어의 평탄도가 향상되는 것은 수지 온도가 높을 때 수지의 점도가 낮아지고, 사출속도가 빠를 때 수지의 냉각이 지연되므로 유동선단의 말단까지 고른 압력 전달이 이루어져 해당 조건에서 압력분포와 점유의 배향이 균일하기 때문으로 사료된다. Fig. 6 에서 제품의 변형 형태를 보면 중심부의 수축으로 인해 새들(saddle) 형태로 변형되는 것을 확인할 수 있는데 보압압력이 높을 때 중심부의 수축이 줄어들어 전체적으로 평탄도가 높아지는 것을 알 수 있다. Fig. 7 은 사출온도 및 사출시간의 변화에 따른 보압전환 시점에서의 압력 분포를 보여주고 있으며, 사출온도가 높을수록 사출시간이 짧을수록 중심부와 말단부의 압력차가 적게 발생되고 고른 압력 분포를 보이는 것을 알 수 있다.

또한, 금형온도가 크게 영향을 미치지 않는 것은 두께 변화가 적은 평판 형태의 성형품에서 냉

각 속도 차이에 의한 수축률 변화가 크지 않고, 충전 시간이 짧아 금형면에서의 열전달이 상대적으로 늦게 일어났기 때문으로 판단된다. 성형해석의 예측 결과에서도 Z 방향의 변형량 중 섬유 배향에 의한 변형이 약 0.119 mm 로 전체 Z 방향 변형량의 84.7%를 차지하였으며, 수축률 차이와 냉각에 의한 변형은 15.3%에 불과하였다.

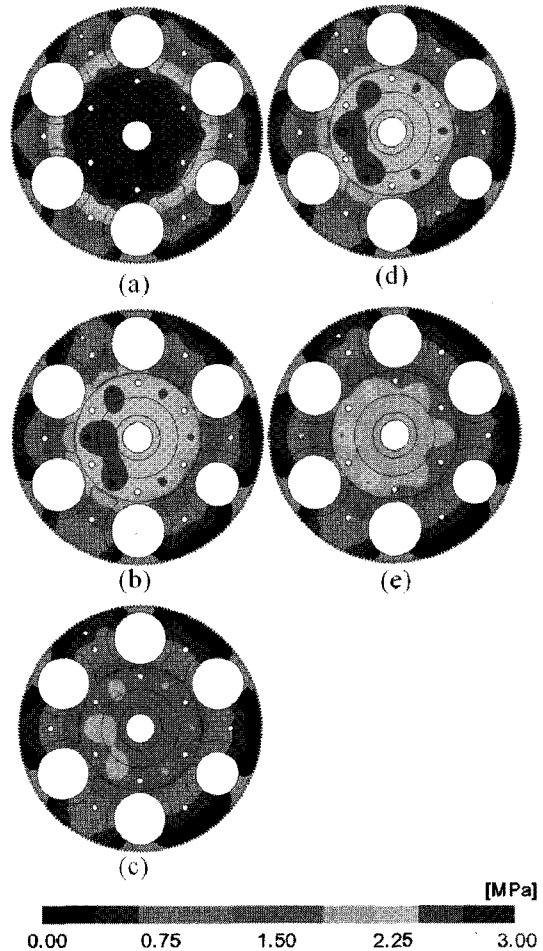


Fig. 7 Pressure at P/V switchover (Packing pressure 16Mpa, Mold temperature 80 °C)

| | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Injection temp.(°C) | 300 | 320 | 340 | | |
| Filling time (sec) | 0.5 | | 1.5 | 1 | |

4. 실험 및 측정결과

Fig. 8 은 자동시력검사기용 디스크 기어의 사출

성형을 위한 개발 금형을 보여 준다. 개발 금형은 성형 해석 결과를 바탕으로 6 점 핀포인트 게이트를 가지는 3 매판 금형으로 제작되었으며, 일본 JSW 사의 형체력 85 톤 전동 사출기(J85ELII-K)를 이용하여 시작품을 제작하였다.

Fig. 9 는 실제 사출품의 평탄도를 비접촉식 3 차원 측정기(OGP 사, Smartscope Flash)를 이용하여 측정한 결과를 보여준다. 최대 변형은 0.196mm 로 예측 결과와 근소한 차이를 보였으나, 품질 기준치를 만족함을 알 수 있다.

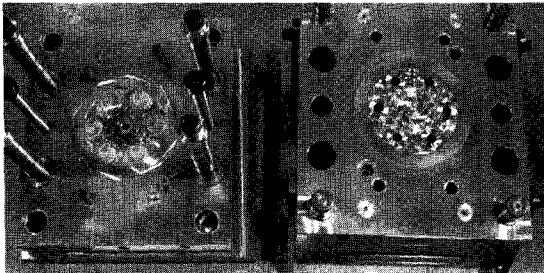
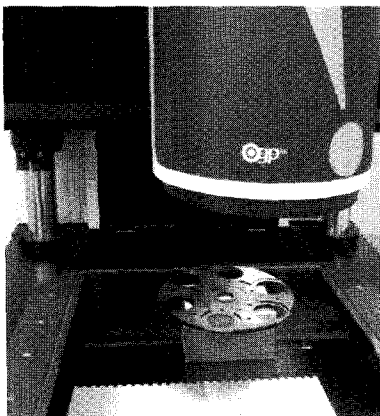
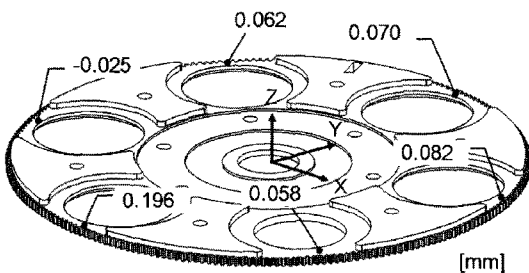


Fig. 8 Photograph of experimental mold



(a) Optical measurement system



(b) Measured Z-dir. deflection

Fig. 9 Measuring flatness of disk gear(#3, #4)

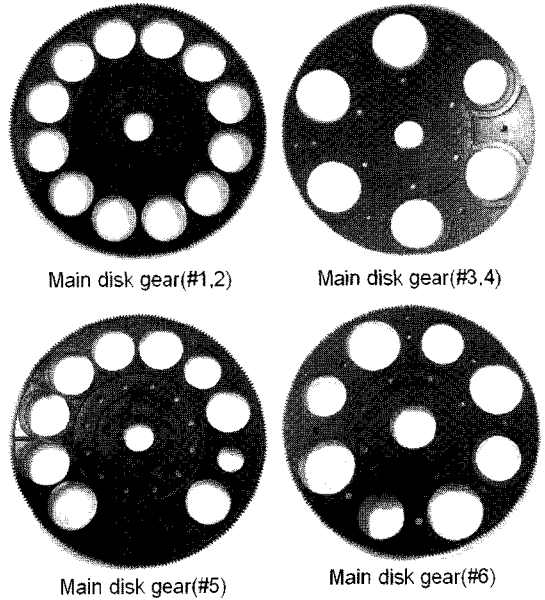


Fig. 10 Developed main disk gears for auto phoroapter system

자동굴절검사기 개발을 위한 기타 주 디스크 기어에 대해서도 성형해석과 실험계획법을 통하여 변형을 최소화 하였으며, Fig. 10 는 본 연구에서 제작된 자동굴절검사기용 대형 디스크 기어를 보여 준다.

5. 결론

본 연구에서는 시력 측정장치인 자동굴절검사기에 사용되는 110mm 급 대형 디스크 기어에 대하여 성형해석과 실험계획법을 적용하여 성형조건 최적화를 수행하였다. 사출공정의 주요 공정변수를 사출온도, 충전시간과 보압압력, 금형온도로 정하고 다구치 방법에 의해 $L_{27}(3^4)$ 직교표에 배치하여 분석한 결과 사출온도와 보압압력이 본 연구의 품질 특성치에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 수지 온도가 높을수록, 보압이 클수록, 사출속도가 빠를수록 유리 강화섬유가 포함된 원판형 플라스틱 기어의 평탄도가 향상되었다.

이를 바탕으로 실제 개발 금형과 시작품을 제작하여 변형량을 측정한 결과와 예측 값과 0.05mm 의 근소한 차이를 보였으나, 품질 기준치를 만족함을 알 수 있었다. 자동굴절검사기 개발을 위한 기타 주 디스크 기어에 대해서도 동일한

기법을 통하여 변형을 최소화하여 제품생산에 적용하였다. 본 연구에서는 원판형 기어의 휨에 대해서만 성형공정 최적화를 수행하였으나, 정밀 플라스틱 기어를 생산하기 위해서는 기어 치형의 설계 및 금형의 정밀 제작, 성형, 측정 등을 고려해야 하며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 2009 학년도 인하공업전문대학 교내 연구비지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Lee, S. C., Kim, C. H., Kwon, O. K. and Huh, Y. J., "Cavity Design for Injection Molded Gears by the Compensation Method of Design Parameters," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 20, No. 10, pp. 3124-3151, 1996.
2. Chong, T. H., Moon, C. K. and Ha, Y. W., "Strength Estimation of Injection Molded Plastic Stepped Spur Gear," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 15, No. 3, pp. 17-23, 2006.
3. Kwon, Y. S., Kwak, J. S. and Jeong, Y. D., "Effect Analysis and Optimization of Injection Molding Process On Shrinkage of Plastic Gear," Proc. of KSMPE Autumn Conference, pp. 257-261, 2006.
4. Kwon, Y. S., Kwak, J. S. and Jeong, Y. D., "Optimization of Injection Molding Process for Gear Using Design of Experiments," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 113-114, 2006.
5. Chong, T. H., Kang, K. K. and Ha, Y. W., "Fatigue Life Evaluation of Plastic Gear," Proc. of KSMTE Spring Conference, pp. 239-245, 2005.
6. Kwon, Y. S. and Jeong, Y. D., "Development of the injection mold structure for internal gears," Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 12, No. 6, pp. 78-82, 2008.
7. Chong, T. H. and Ha, Y. W., "Injection Molded Microcellular Plastic Gear(I)- Process Design for the Microcellular Plastic Gear," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 29, No. 5, pp. 647-654, 2005.
8. Min, B. H., "Development of Engineering Plastic Gear Based on Injection Molding Process," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 71-78, 1999.
9. Chong, T. H., Ha, Y. W. and Takahashi, H., "Injection Molded Microcellular Plastic Gear(II)-Characteristics of the Counter Pressurized Microcellular Plastic Gear," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 29, No. 5, pp. 655-662, 2005.
10. Kim, B. H., Jang, W. J., Kim, J. H., Cho, J. H., Park, Y. H. and Choe, S. J., "Application of CAE in Injection Molding Process," HWAHAK KONGHAK, Vol. 41, No. 5, pp. 577-584, 2003.